

(2) Japanese Patent Application Laid-Open No. 11-296561 (1999)
"WORST CASE MODEL PARAMETER GENERATING METHOD AND DEVICE"

5 The following is an extract relevant to the present application.

Fig. 2 is a flowchart showing one example of a data processing flow indicative of a method of generating a worst case model parameter according to preferred embodiments of the present invention. Each step will now be described with reference to this Figure.

Step 1: When inputting data, values which specify a reference value and a distribution of independent elements (variation factors during manufacturing such as a process temperature and the like), a desired value of a focused device characteristic, and the RSM (Response Surface Model) equation are inputted.

15 Step 2: When calculating a sensitivity, a model parameter is generated using a reference value of independent elements and the RSM equation to determine a sensitivity of independent elements with respect to a focused device characteristic (for instance, a direct-current amplification ratio h_{FE} in a bipolar transistor, under the condition of a saturation voltage between collector-emitter $V_{ce} = 5V$, a collector current $I_c = 100 \mu A$) using a circuit simulator.

20 Step 3: When calculating a worst point, the following assumption and equations (1) and (2) are used. Now, the assumption (i) and (ii) are made.

(i) The elements that vary a model parameter have independently the Gaussian distribution, and if those are normalized, the shape of a region having an equal distribution probability becomes the n-dimensional ball (a is a radius of a ball).

25 $\Delta P_i \delta$: a value indicative of a distribution of independent elements (δ , for example)

Δp_i : the amount of shift of independent elements from a reference value

30 (ii) Variations in independent elements are slight with respect to a reference value of the independent elements, and the effect on a device characteristic can be approximately obtained by the sum of the product of the sensitivity of each

independent element and the amount of shift.

ΔD : the amount of shift in a device characteristic

S_i : a sensitivity of the i th independent element with respect to a device characteristic

5 When a desired value of a device characteristic is specified, an equation calculating a worst point is expressed as an equation (3).

 When tolerable limit values of independent elements are specified, an equation (4) is derived with the assumption that the tolerable limit value is $a\delta$ ($a=3$ in case of 3δ).

10 Further, when tolerable limit values of independent elements and a desired value of a device characteristic are specified and an independent element k for adjusting a distribution is specified, an equation (5) is derived with the assumption that the tolerable limit value is $a\delta$, and a scale with respect to the distribution of the independent element k is b .

15 In the above-mentioned case, a distribution obtained as a result of an independent element for adjusting a distribution is $b\Delta p_k\delta$.

 Step 4: When calculating a model parameter, a worst point (a value in which a reference value and the Δp_i provided at said equation are summed) provided at the process of calculating a worst point is substituted into the RSM equation to
20 determine a model parameter.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-296561

(43) 公開日 平成11年(1999)10月29日

(51) Int.Cl.⁸

識別記号

F I

G 0 6 F 17/50

G 0 6 F 15/60

6 6 2 G

17/00

15/20

D

H 0 1 L 21/82

15/60

6 6 8 A

H 0 1 L 21/82

C

審査請求 未請求 請求項の数12 O L (全 9 頁)

(21) 出願番号

特願平10-94490

(22) 出願日

平成10年(1998) 4月 7日

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72) 発明者 川喜田 秀行

神奈川県川崎市幸区堀川町580番1号 株式会社東芝半導体システム技術センター内

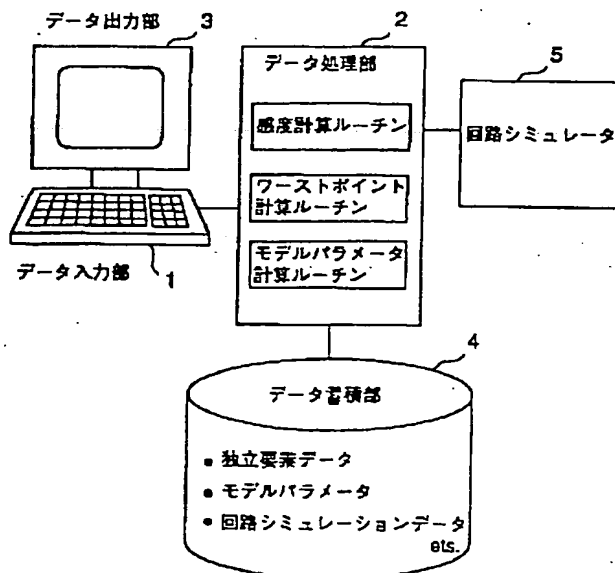
(74) 代理人 弁理士 鈴江 武彦 (外6名)

(54) 【発明の名称】 ワーストケース・モデルパラメータ生成方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】注目素子特性に関し、ワースト値、独立要素の許容限界等の条件から、また、指定の素子特性値（保証値）を示すモデルパラメータに対応する独立要素の条件からワーストケース・モデルパラメータ生成方法、及び装置を提供する。

【解決手段】データ入力部1は、モデルパラメータの変動に影響を与える独立要素の基準値、独立要素の分布を指定する値、注目素子特性の所望値、モデルパラメータと独立要素の関係式が入力される。データ処理部2で、注目素子特性に対する独立要素の感度、ワーストポイント、モデルパラメータ等の計算を行う。感度計算によって求められた感度のデータ、独立要素の基準値、素子特性の所望値あるいは独立要素の許容限界値から、モデルパラメータの存在確率が一定の独立要素の領域で指定の情件に合致した素子特性の最小値または最大値を取る独立要素の値が求められる。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える 1 以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、注目素子特性の所望値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得工程と、

前記注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算工程と、

前記感度計算により得られた感度と前記取得手段から得られたデータを用いてモデルパラメータの存在確率が実質一定の前記独立要素の領域において注目素子特性の最小値または最大値を前記所望値に一致させるための前記独立要素の値を求めるワーストポイント計算工程と、前記ワーストポイント計算で得られた前記独立要素の値と前記関係式からモデルパラメータを計算するモデルパラメータ計算工程とを具備したことを特徴とするワーストケース・モデルパラメータ生成方法。

【請求項 2】 少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える 1 以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、正規化された前記独立要素の分布の許容限界値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得工程と、

注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算工程と、

前記感度計算により得られた感度と前記データ取得手段から得られたデータを用いて前記独立要素の分布の許容限界値におけるモデルパラメータの存在確率を有する独立要素の領域で注目素子特性が最小値あるいは最大値を示す独立要素の値を求めるワーストポイント計算工程と、

前記ワーストポイント計算で得られた前記独立要素の値と前記関係式からモデルパラメータを計算するモデルパラメータ計算工程とを具備したことを特徴とするワーストケース・モデルパラメータ生成方法。

【請求項 3】 前記データ取得工程において、少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える 1 以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、正規化された前記独立要素の分布の許容限界値、前記独立要素の 1 つを指定する独立要素指定入力、注目素子特性の所望値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得工程と、

注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算工程と、

前記感度計算により得られた感度と前記データ取得手段から得られたデータを用いて前記独立要素の分布の許容限界値におけるモデルパラメータの存在確率を有する独立要素の領域で注目素子特性の最小値あるいは最大値が注目素子特性の所望値を示すように前記独立要素指定入

力で指定された独立要素の分布を調節して独立要素の値を求めるワーストポイント計算工程と、

前記ワーストポイント計算で求めたワーストポイントに対応する前記独立要素指定入力で指定された独立要素の分布の取得工程とを具備したことを特徴とするワーストケース・モデルパラメータ生成方法。

【請求項 4】 前記独立要素のいくつかに固定の値が指定されることを特徴とする請求項 1 ないし 3 いずれか 1 つに記載のワーストケース・モデルパラメータ生成方法。

【請求項 5】 前記感度計算工程に関して、素子特性ごとの計算手順を記述する手順記述を用いることを特徴とする請求項 1 ないし 3 いずれか 1 つに記載のワーストケース・モデルパラメータ生成方法。

【請求項 6】 所望の素子特性値を示すように生成されたモデルパラメータに対応する各独立要素の値、基準値からのシフト量、またはシフト量の正規化された値を出力する工程を具備したことを特徴とする請求項 1 ないし 3 いずれか 1 つに記載のワーストケース・モデルパラメータ生成方法。

【請求項 7】 少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える 1 以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、注目素子特性の所望値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得手段と、前記注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算、前記感度計算により得られた感度と前記取得手段から得られたデータを用いてモデルパラメータの存在確率が実質一定の前記独立要素の領域において注目素子特性の最小値または最大値を前記所望値に一致させるための前記独立要素の値を求めるワーストポイント計算、及び前記ワーストポイント計算で得られた前記独立要素の値と前記関係式からモデルパラメータを計算するモデルパラメータ計算、の各処理を行うデータ処理手段と、

前記データ処理手段に応じた前記独立要素のワーストパラメータセットを出力する出力手段とを具備したことを特徴とするワーストケース・モデルパラメータ生成装置。

【請求項 8】 少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える 1 以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、正規化された前記独立要素の分布の許容限界値、注目素子特性の所望値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得手段と、

注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算、前記感度計算により得られた感度と前記データ取得手段から得られたデータを用いて前記独立要素の分布の許容限界値におけるモデルパラメータの存在確率を有する独立要素の領域で注目素子特性が最小値あるい

は最大値を示す独立要素の値を求めるワーストポイント計算、及び前記ワーストポイント計算で得られた前記独立要素の値と前記関係式からモデルパラメータを計算するモデルパラメータ計算、の各処理を行うデータ処理手段と、

前記データ処理手段に応じた前記独立要素のワーストパラメータセットを出力する出力手段とを具備したことを特徴とするワーストケース・モデルパラメータ生成装置。

【請求項 9】 少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える 1 以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、正規化された前記独立要素の分布の許容限界値、前記独立要素の 1 つを指定する独立要素指定入力、注目素子特性の所望値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得手段と、

注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算、前記感度計算により得られた感度と前記データ取得手段から得られたデータを用いて前記独立要素の分布の許容限界値におけるモデルパラメータの存在確率を有する独立要素の領域で注目素子特性の最小値あるいは最大値が注目素子特性の所望値を示すように前記独立要素指定入力で指定された独立要素の分布を調節して独立要素の値を求めるワーストポイント計算、及び前記ワーストポイント計算で求めたワーストポイントに対応する前記独立要素指定入力で指定された独立要素の分布の取得、の各処理を行うデータ処理手段と、

前記データ処理手段に応じた前記独立要素のワーストパラメータセットを出力する出力手段とを具備したことを特徴とするワーストケース・モデルパラメータ生成装置。

【請求項 10】 前記独立要素のいくつかに固定の値が指定されることを特徴とする請求項 7 ないし 9 いずれか 1 つに記載のワーストケース・モデルパラメータ生成装置。

【請求項 11】 前記データ処理手段のうちの感度計算に関して、素子特性ごとの計算手順を記述する手順記述手段を有することを特徴とする請求項 7 ないし 9 いずれか 1 つに記載のワーストケース・モデルパラメータ生成装置。

【請求項 12】 前記出力手段は、前記ワーストパラメータセットの出力の他に、所望の素子特性値を示すように生成されたモデルパラメータに対応する各独立要素の値、基準値からのシフト量、またはシフト量の正規化された値を出力することを特徴とする請求項 7 ないし 9 いずれか 1 つに記載のワーストケース・モデルパラメータ生成装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、特に電子回路設計

計で行われている回路シミュレーションにおいて用いられるモデルパラメータセットの生成と、モデルパラメータの基になるプロセスの制御を支援する方法及びその装置に関する。

【0002】

【従来の技術】近年、高周波回路設計や電源の低電圧化により、デバイスの特性に対し、マージンの少ない回路設計が行われるようになってきている。このような状況では、デバイスの特性変動が回路の信頼性、ひいては製品の歩留まりを左右する。従って、ワーストケース解析は高信頼性の回路の設計、歩留まりの高い回路製品を実現する上で重要である。

【0003】従来、アナログ回路のワーストケース解析のためのモデルパラメータとして、プロセス条件のような独立要素（例えばプロセス中のある温度や不純物のドーザ量など素子回路の特性に影響する製造上の様々な変動要因）の最大値、最小値の組み合わせ条件に対応するパラメータセット（corner model：コーナーモデル）がある。

【0004】図 7 は、上記コーナーモデルに関する独立要素空間における存在確率を示す概念図である。横軸の $\Delta P 1$ は、ある一つの独立要素の中心値からの正規化されたシフト量を示し、縦軸の $\Delta P 2$ は別のある一つの独立要素の中心値からの正規化されたシフト量を示す。円の線上は存在確率（ある一つの独立要素のみが例えば 3σ シフトとする確率）の等しい領域を表わす。破線は、各独立要素の最大値、最小値を設定したときの組み合わせで、各象限に \times 印のようなワーストケース・モデルパラメータが生成されることを表わしている。

【0005】図 7 から、ある独立要素の最大値、最小値、いわゆる許容限界値（例えば $\pm 3\sigma$ ）を各独立要素に当てはめると、想定しているモデルパラメータの存在確率より低い存在確率のモデルパラメータが生成されてしまう。換言すれば、設定した独立要素の存在確率よりも厳しい条件のパラメータセットを生成してしまう問題がある。

【0006】また、独立要素の最大値、最小値の組み合わせを用いるので、変動させる独立要素の数 n に対し、 2^n 個のパラメータが生成される。このため、 n が大きくなると生成されるパラメータの数も急増し、解析時間と規模が大きくなる問題もある。

【0007】これに対し、他のパラメータセットの生成方法として、独立要素の一つに関して最大値、最小値を設定してそれぞれパラメータセットを得る方法（boundary model：バウンダリモデル）も提唱されている。

【0008】図 8 は、上記バウンダリモデルに関する独立要素空間における存在確率を示す概念図である。横軸の $\Delta P 1$ は、ある一つの独立要素の中心値からの正規化されたシフト量を示し、縦軸の $\Delta P 2$ は別のある一つの独立要素の中心値からの正規化されたシフト量を示す。

円の線上は図7同様に存在確率の等しい領域を表わす。一方の独立要素の存在確率の最大値、最小値を設定したときは、他方の独立要素の存在確率は中心値（偏差ゼロの値）を設定する。これにより、×印のように円の線上に乗る、すなわち、想定している存在確率に合ったワーストケース・モデルパラメータが生成される。

【0009】上記方法によれば、変動させる独立要素の数 n に対し、パラメータ数は $2n$ に抑えられる。しかし、ある注目する素子特性に対し、設定した独立要素の存在確率の領域で必ずしもワースト値を取るパラメータを生成するとは限らないといった問題がある。すなわち、図6に示すように他の、例えば Z 軸方向に注目する素子特性を考えると、必ずしも $\Delta P1$ 軸上、 $\Delta P2$ 軸上の×印のパラメータがワースト値ではなく、実際より緩い条件のパラメータセットを生成している場合が考えられるのである。

【0010】

【発明が解決しようとする課題】プロセス開発においては、プロセス変動による素子特性のばらつき範囲を保証値として設定している。回路設計者は少なくともこの保証値において回路が正常動作するように設計を行うのが一般的である。

【0011】この場合、プロセス変動を反映し、かつ、素子特性が保証値を示すモデルパラメータで回路シミュレーションを実行することが有効である。このため、的確なワーストケース・モデルパラメータセットの生成が重要である。

【0012】従来技術において、コーナーモデルは、独立要素の最小値または最大値の組み合わせによりワーストケース・パラメータセットを生成する。このため、実際より厳しい条件のパラメータを生成してしまう問題がある。さらに、パラメータの数に関し、独立要素の数が多くなると急増し、解析時間と解析手段のコスト面で好ましくない。

【0013】また、バウンダリモデルでは、注目する素子特性に対し、必ずしもワースト値を取るとは限らないといった問題がある。従って、上記各ワーストケース・パラメータセットの生成方法では、回路製品の高信頼性、歩留まり向上につながる的確なワーストケース・モデルパラメータを生成するのが困難である。

【0014】この発明は上記のような事情を考慮し、その課題は、プロセス変動を考慮し、モデルパラメータの存在確率が一定の独立要素の領域で、注目素子特性の最大値または最小値を示すモデルパラメータを求める方法、及びその装置を提供すること。さらに、換言すれば、プロセス開発において有効な、指定された素子特性値（例えば保証値）を示すモデルパラメータに対応する独立要素の条件を提示する機能を有するワーストケース・モデルパラメータ生成方法、及び装置を提供することにある。

【0015】

【課題を解決するための手段】ワーストケース・モデルパラメータ生成方法の第1の発明は、少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える1以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、注目素子特性の所望値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得工程と、前記注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算工程と、前記感度計算により得られた感度と前記取得手段から得られたデータを用いてモデルパラメータの存在確率を実質一定の前記独立要素の領域において注目素子特性の最小値または最大値を前記所望値に一致させるための前記独立要素の値を求めるワーストポイント計算工程と、前記ワーストポイント計算で得られた前記独立要素の値と前記関係式からモデルパラメータを計算するモデルパラメータ計算工程とを具備したことを特徴とする。

【0016】ワーストケース・モデルパラメータ生成方法の第2の発明は、少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える1以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、正規化された前記独立要素の分布の許容限界値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得工程と、注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算工程と、前記感度計算により得られた感度と前記データ取得手段から得られたデータを用いて前記独立要素の分布の許容限界値におけるモデルパラメータの存在確率を有する独立要素の領域で注目素子特性が最小値あるいは最大値を示す独立要素の値を求めるワーストポイント計算工程と、前記ワーストポイント計算で得られた前記独立要素の値と前記関係式からモデルパラメータを計算するモデルパラメータ計算工程とを具備したことを特徴とする。

【0017】ワーストケース・モデルパラメータ生成方法の第3の発明は、少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える1以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、正規化された前記独立要素の分布の許容限界値、前記独立要素の1つを指定する独立要素指定入力、注目素子特性の所望値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得工程と、注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算工程と、前記感度計算により得られた感度と前記データ取得手段から得られたデータを用いて前記独立要素の分布の許容限界値におけるモデルパラメータの存在確率を有する独立要素の領域で注目素子特性の最小値あるいは最大値が注目素子特性の所望値を示すように前記独立要素指定入力で指定された独立要素の分布を調節して独立要素の値を求めるワーストポイント計算工程と、前記ワーストポイント計算で求めたワーストポイントに対応する前記独立

要素指定入力で指定された独立要素の分布の取得工程とを具備したことを特徴とする。

【0018】ワーストケース・モデルパラメータ生成装置の第1の発明は、少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える1以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、注目素子特性の所望値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得手段と、前記注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算、前記感度計算により得られた感度と前記取得手段から得られたデータを用いてモデルパラメータの存在確率が実質一定の前記独立要素の領域において注目素子特性の最小値または最大値を前記所望値に一致させるための前記独立要素の値を求めるワーストポイント計算、及び前記ワーストポイント計算で得られた前記独立要素の値と前記関係式からモデルパラメータを計算するモデルパラメータ計算、の各処理を行うデータ処理手段と、前記データ処理手段に応じた前記独立要素のワーストパラメータセットを出力する出力手段とを具備したことを特徴とする。

【0019】ワーストケース・モデルパラメータ生成装置の第2の発明は、少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える1以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、正規化された前記独立要素の分布の許容限界値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得手段と、注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算、前記感度計算により得られた感度と前記データ取得手段から得られたデータを用いて前記独立要素の分布の許容限界値におけるモデルパラメータの存在確率を有する独立要素の領域で注目素子特性が最小値あるいは最大値を示す独立要素の値を求めるワーストポイント計算、及び前記ワーストポイント計算で得られた前記独立要素の値と前記関係式からモデルパラメータを計算するモデルパラメータ計算、の各処理を行うデータ処理手段と、前記データ処理手段に応じた前記独立要素のワーストパラメータセットを出力する出力手段とを具備したことを特徴とする。

【0020】ワーストケース・モデルパラメータ生成装置の第3の発明は、少なくとも、回路シミュレーションに用いるモデルパラメータの変動に影響を与える1以上の独立要素の基準値、前記独立要素の分布を指定する値、正規化された前記独立要素の分布の許容限界値、前記独立要素の1つを指定する独立要素指定入力、所望値、及び前記独立要素とモデルパラメータの関係式を得るデータ取得手段と、注目素子特性に対する前記独立要素の感度が計算される感度計算、前記感度計算により得られた感度と前記データ取得手段から得られたデータを用いて前記独立要素の分布の許容限界値におけるモデルパラメータの存在確率を有する独立要素の領域で注目

素子特性の最小値あるいは最大値が注目素子特性の所望値を示すように前記独立要素指定入力で指定された独立要素の分布を調節して独立要素の値を求めるワーストポイント計算、及び前記ワーストポイント計算で求めたワーストポイントに対応する前記独立要素指定入力で指定された独立要素の分布の取得、の各処理を行うデータ処理手段と、前記データ処理手段に応じた前記独立要素のワーストパラメータセットを出力する出力手段とを具備したことを特徴とする。

【0021】また、第1ないし第3の発明に対し、前記出力工程あるいは前記出力手段は、前記ワーストパラメータセットの出力の他に、所望の素子特性値を示すように生成されたモデルパラメータに対応する各独立要素の値、基準値からのシフト量、またはシフト量の正規化された値を出力することを特徴とする。

【0022】この発明では、注目素子特性に対するワーストケース・モデルパラメータを、素子特性のワースト値、独立要素の許容限界値等の条件において生成する。そのため、注目素子特性に対し、適切なワーストケース・モデルパラメータが得られる。また、ワーストケース・モデルパラメータセットの個数が注目素子特性の数で決められる。

【0023】

【発明の実施の形態】図1はこの発明の各実施形態に係るワーストケース・モデルパラメータ生成装置を示す概念図である。この図1を参照して第1の実施形態に係るワーストケース・モデルパラメータ生成装置について説明する。データ入力部1は、モデルパラメータの変動に影響を与える独立要素の基準値、その独立要素の分布

(例えば、プロセス工程のパラメータまたは、それを反映したモニタ情報)を指定する値(例えば、 σ :標準偏差)、注目素子特性の所望値、モデルパラメータと独立要素の関係式(Response Surface Model: RSM式)が入力される。入力方法としては、キーボード等から打ち込む他に、予め電子ファイルにデータを作成しておき、そのファイルをロードする方法などが考えられる。

【0024】データ処理部2は、注目素子特性に対する独立要素の感度計算、ワーストポイント計算、モデルパラメータ計算等のデータ処理を行う。感度計算ルーチンでは、データ入力部で入力された独立要素の基準値、RSM式からSPICEに代表される回路シミュレータ5のモデルパラメータファイルが生成され、それを用いた回路シミュレーション結果から感度を計算する方法が考えられる。

【0025】ワーストポイント計算ルーチンでは、感度計算によって求められた感度のデータ、独立要素の基準値、素子特性の所望値から、モデルパラメータの存在確率が一定の独立要素の領域で、素子特性の最小値または最大値が上記所望値に一致する独立要素の値(ポイント)が求められる。これにより、複数の独立要素が注目

素子特性に影響を与えている場合でも、一つのワーストケースのポイントを特定することが可能となる。

【0026】モデルパラメータ計算ルーチンでは、ワーストポイント計算によって求められた独立要素の値がRSM式に代入され、ワーストポイントに対応するモデルパラメータが計算される。

【0027】データ出力部3は、ワーストポイント計算、モデルパラメータ計算等で求められたワーストケース・モデルパラメータが出力される。その他、パラメータに対応する独立要素の値、基準値からのシフト量あるいは正規化されたシフト量、注目素子特性と独立要素の関係のグラフ表示などが出力される。

【0028】出力部には通常ディスプレイが用いられるが、同時にデータ蓄積部4にも出力は行われる。これらの出力を得ることにより、ユーザは生成したモデルパラメータに影響を与えている独立要素が何であるかを知ることが可能になり、素子特性の所望値に対して、プロセスがどのくらいの余裕を持っているかを判断することが可能になる。

【0029】データ蓄積部4には、上記の出力結果のみでなく、感度計算あるいはワーストポイント計算等で発生する中間的なデータ（例えば、回路シミュレーション結果、テンポラリなモデルパラメータ等）も蓄積される。データ蓄積部4には通常ハードディスク等の外部記憶装置が用いられる。

【0030】また、上記図1を参照して第2の実施形態に係るワーストケース・モデルパラメータ生成装置について説明する。第1の実施形態で示したデータ入力部1において、素子特性の所望値を入力する代わりに、正規化された独立要素の分布の許容限界値、例えば3σが入力される。

【0031】この許容限界値は、ワーストポイント計算ルーチンにおいて、感度のデータ、独立要素の基準値と共に、許容限界の値におけるモデルパラメータの存在確率を有する独立要素の領域で、注目素子特性が最小値または最大値を示す独立要素の値の計算に用いられる。これにより、一つのワーストポイントを特定することが可能になる。

【0032】また、図1を参照して第3の実施形態に係るワーストケース・モデルパラメータ生成装置について説明する。第1の実施形態に、第2の実施形態を盛り込んだ形態になる。独立要素の許容限界の値が指定され、注目素子特性が最小値または最大値を示す領域が決められるが、素子特性の所望値も指定入力されるため、素子特性の所望値に合うように、独立要素指定入力により指定された独立要素の分布が調節される。ワーストポイント計算ルーチンで求められた指定された独立要素の分布はデータ出力部3に出力されることになる。同時に、データ蓄積部4にも出力は行われる。

【0033】図2は、この発明の各実施形態に係るワーストケース・モデルパラメータ生成方法を示すデータ処理フローの一例を示すフローチャートである。この図に沿って各ステップを説明する。

【0034】ステップ1：データ入力では、独立要素の基準値及び分布を指定する値、注目素子特性の所望値、RSM式が入力される。

ステップ2：感度計算では、独立要素の基準値、RSM式を用いてモデルパラメータを作成し、回路シミュレータを用いて注目素子特性（例えば、バイポーラトランジスタにおける直流増幅率 h_{FE} 、コレクタエミッタ間飽和電圧 $V_{ce}=5V$ 、コレクタ電流 $I_c=100\mu A$ ）に対する独立要素の感度を求める。

【0035】ステップ3：ワーストポイント計算では、以下の仮定及び計算式を用いて、ワーストポイントを計算する。仮定としては、次の(i)、(ii)の2点を考える。

(i) モデルパラメータを変動させる要素は独立でガウス分布であり、正規化されていれば、分布確立の等しい領域の作る形状はn次元の球になる（aは球の半径）。

【0036】

【数1】

$$\Delta \bar{p}_1^2 + \Delta \bar{p}_2^2 + \dots + \Delta \bar{p}_n^2 = a^2$$

$$\Delta \bar{p}_i = \frac{\Delta p_i}{\Delta p_{i\sigma}}$$

$\Delta p_{i\sigma}$: 独立要素の分布を示す値（例えばσ）

$\Delta \bar{p}_i$: 独立要素の基準値からのシフト量

(ii) 独立要素のばらつきは独立要素の基準値に対し微小であり、素子特性への影響は、各独立要素の感度とシフト量の積で近似できる。

【0037】

【数2】

$$\Delta D = \bar{s}_1 \Delta \bar{p}_1 + \bar{s}_2 \Delta \bar{p}_2 + \dots + \bar{s}_n \Delta \bar{p}_n$$

$$\bar{s}_i = s_i \Delta p_{i\sigma}$$

ΔD : 素子特性のシフト量

s_i : 素子特性に対するi番目の独立要素の感度

ワーストポイントを計算する式は、素子特性の所望値が指定される第1の実施形態による場合は次式となる。

【0038】

【数3】

$$\Delta p_i = \frac{\bar{s}_i \Delta p_{i\sigma}}{\sum_{j=1}^n \bar{s}_j^2} \Delta D$$

また、独立要素の許容限界値が指定される第2の実施形態の場合、許容限界値が $a\sigma$ （3σなら $a=3$ ）とすると、次式で表わせる。

【0039】

【数4】

$$\Delta p_i = \pm \frac{\bar{s}_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \bar{s}_j^2}} a \Delta p_{i\sigma}$$

【0040】また、独立要素の許容限界値と、素子特性の所望値が指定され、分布を調節するための独立要素 k の指定がされる第3の実施形態の場合、許容限界値が $a\sigma$ 、独立要素 k の分布に対するスケールを b とすると、次式となる。

【0041】

【数5】

$$\Delta p_i = \frac{a^2 \bar{s}_i \Delta p_{i\sigma}}{\Delta D} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad i \neq k$$

$$\Delta p_k = \frac{a^2 b^2 \bar{s}_k \Delta p_{k\sigma}}{\Delta D}$$

$$b = \frac{1}{\bar{s}_k} \sqrt{\frac{\Delta D^2}{a^2} - \sum_{j=1}^{k-1} \bar{s}_j^2 - \sum_{j=k+1}^n \bar{s}_j^2}$$

【0042】上記のケースでは、分布調節のための独立要素の結果として得られる分布は、 $b \Delta p_{k\sigma}$ ということになる。

ステップ4：モデルパラメータ計算では、ワーストポイント計算で得られたワーストポイント（基準値に上記の式で得られた Δp_i を加えた値）の値をRSM式に代入してモデルパラメータが計算される。

【0043】図3は、独立要素に固定値を入力するフォームの一例である。フォームには独立要素の一覧が表示され、基準値または固定値を入力する欄と標準偏差 σ を入力する欄がある。その右には独立要素を固定値にするかどうかを切り替えるボタンがある。ユーザは固定値を設定したい独立要素の基準値／固定値欄に所望の値を入力し、切り替えボタンを押すことで設定することができる。切り替えボタンの右のボタンは基準値／固有値の欄の値をデフォルトの基準値に戻す機能を有する。

【0044】独立要素に固定値を与える効果は、より限定した条件のモデルパラメータの生成が可能となる点が挙げられる。一例として、バウンダリモデルは独立要素一つを除いて全てを基準値とすることによって求めることが可能である。

【0045】図4は、素子特性計算手順を記述するフォームの一例である。注目される素子特性は、回路の種類により様々であり、予め全ての素子特性を準備することは困難である。そこで、素子特性計算手順におけるユーザ定義を許すことで、上記問題に対応することが可能になる。

【0046】例えば、図4のSIM（“FILE_A” DATA）は、FILE_Aのネットリストに対してシミュレーションを実行し、結果をDATAに格納することを意味し、GET_Y（100E-6 DATA）はDATAからXの値が100E-6となるYの値を返す

ことを意味する。

【0047】図5は、独立要素の空間における存在確率を説明する概念図である。図5のような2次元の場合、前記の仮定によれば、独立要素の分布確立（モデルパラメータの存在確率）が等しい独立要素空間の領域は基準値（センター値）を中心とする円で表現される。

【0048】ここで、前記図7に示したコーナーモデルは、2次元の独立要素の空間では、X印のついているポイントがコーナーモデルに相当する。従って、想定している許容限界値（例えば3 σ ）を各独立要素に当てはめると、想定しているモデルパラメータの存在確率より低い存在確率、すなわち、厳しすぎるモデルパラメータが生成される。

【0049】また、前記図8に示したバウンダリモデルは、2次元の独立要素の空間では、想定しているモデルパラメータの存在確率に合ったモデルパラメータが生成されることがわかる。しかし、他の次元、例えば、Z軸方向に注目する素子特性を考えると、必ずしも最小（最大）の素子特性を示すモデルパラメータを生成しているとは限らない。

【0050】図6は、この発明におけるモデルパラメータセットを独立要素の空間に関連づけて説明する概念図である。この発明では注目素子特性への影響を計算した独立要素の感度を用いることにより、他の次元（例えば、ここではZ軸方向）に注目素子特性を割り当てた場合、○印のような素子特性の最小値または最大値のモデルパラメータを生成することが可能となる。×印は、バウンダリモデルに相当する。

【0051】以上述べた通り、従来のコーナーモデルやバウンダリモデルでは、注目する素子特性に対し、モデルパラメータの存在確率が一定の独立要素の領域での最小あるいは最大の値に対応するモデルパラメータは生成されない。しかし、この発明によれば、感度を用いることにより、適切なワーストケース・モデルパラメータを生成することができる。さらに、ワーストケースの個数が注目している素子特性に依存するので、必要以上にモデルパラメータの数が増えることはない。これは効率的に回路シミュレーションが行えることを意味する。

【0052】また、プロセスの保証値がワーストケースとなるようなモデルパラメータを容易に生成できるため、プロセスの保証限界での回路動作検証が適切に行える。さらに、独立要素に固定値をセットする機能や、素子特性計算手順の定義機能により、ユーザが希望するワーストケース・モデルパラメータを容易に生成できる。

【0053】プロセス開発の見地からは、素子特性のばらつきを目標に合わせるために、独立要素の分布をどれくらいに制御すればよいかを定量的に知ることができ。これは、プロセスの早期立ち上げに大きな効果がある。

【0054】

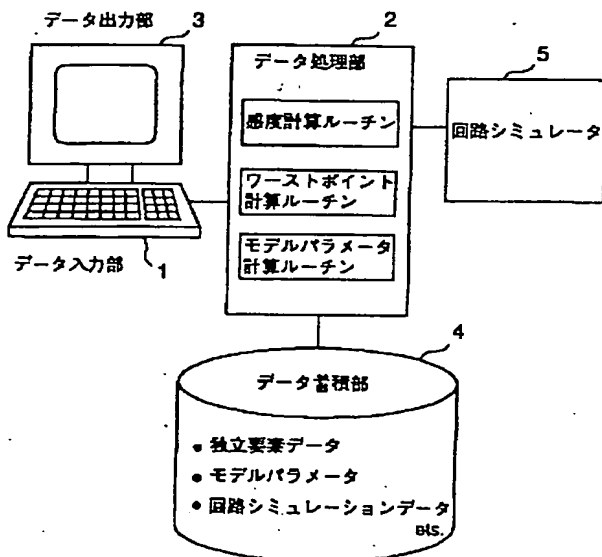
【発明の効果】以上説明したようにこの発明によれば、注目素子特性に対し、適切なワーストケース・モデルパラメータが得られる。ワーストケース・モデルパラメータセットの個数が注目素子特性の数で決まるため、少ないパラメータセットで効率的に回路検証することが可能となる。すなわち、注目素子特性に対するワーストケース・モデルパラメータを、ユーザ指定のワースト素子特性や、独立要素の許容限界値等の条件に合わせて生成することができる。このため、回路設計者の意図に合った回路検証が可能となる。また、プロセス検証値をクリアするための独立要素の制御範囲が定量的に得られるので、プロセス開発が促進されるワーストケース・モデルパラメータ生成方法及び装置が提供できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】この発明の各実施形態に係るワーストケース・モデルパラメータ生成装置を示す概念図。

【図2】この発明の各実施形態に係るワーストケース・モデルパラメータ生成方法を示すデータ処理フローの一例を示すフローチャート。

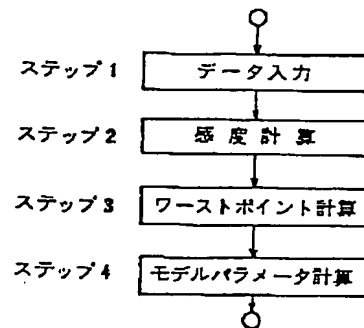
【図1】



【図4】

特性名	HFE100U
特性手順	<pre>SIM('FILE_A' DATA) GET_Y(100E-6 DATA);</pre>

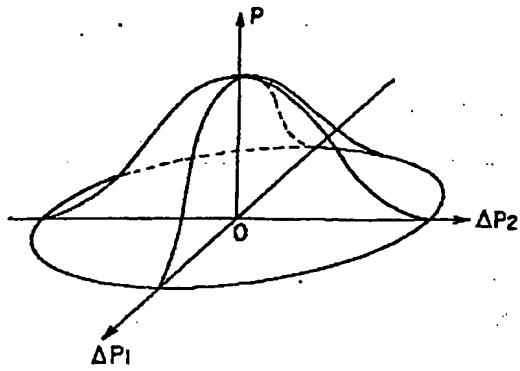
【図2】



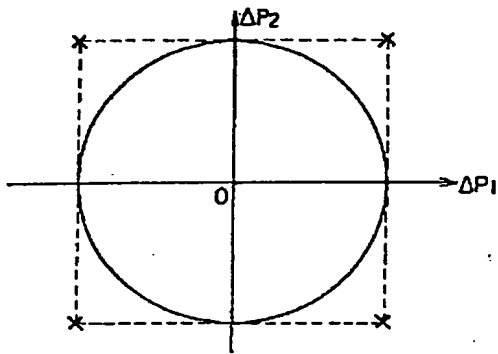
【図3】

	基準値/固定値		σ	FIX		DEFAULT
要素 1	1E-6	1E-8	四	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
要素 2	100	20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
要素 3	2E-3	5E-4	四	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
要素 4	3E-4	2E-5	四	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
要素 5	1000	80	四	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
要素 6	0	2	四	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
要素 7	1E-2	3E-3	四	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
要素 8	20	4	四	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

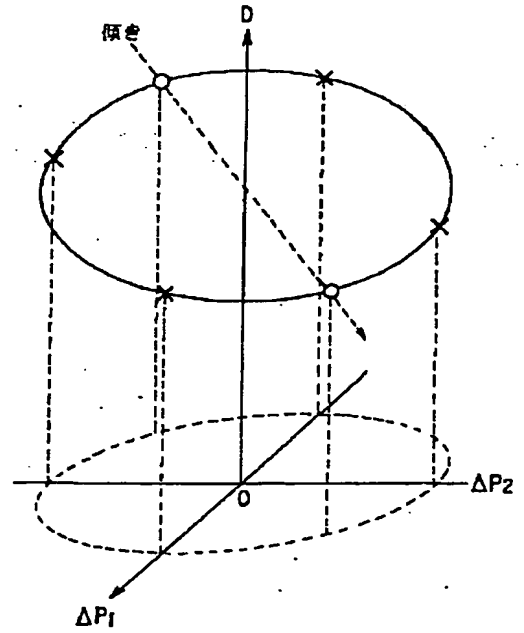
【図 5】



【図 7】



【図 6】



【図 8】

